



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



电工电子技术

● 王鼎 王桂琴 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



TM
89

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电工电子技术

主 编 王 鼎 王桂琴
副主编 詹迪铎 吴丽波 葛玉明
主 审 刘 刚



机械工业出版社

本书是根据教育部高等院校“电工学”课程指导组制定的非电类“电工学”课程教学基本要求,结合编者多年的教学实践,为进一步提高学生的综合素质与自主创新能力,并为推进高等院校教学改革中的精品课建设而编写的。

全书内容分为直流电路、交流电路、电机与控制、模拟电子电路、数字电子电路五篇,共包含十七章内容。除每章后附有习题外,还独具特色地在每一篇结尾配有综合训练,其内容包括:阶段小测验、趣味阅读、能力开发与创新三个栏目。

本书配有电子教案,欢迎选用本书作教材的老师索取,索取邮箱:wbj@mail.machinfo.gov.cn

本书可用作高等院校非电类专业的教材,也可供其他社会读者使用。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子技术/王鼎,王桂琴主编. —北京:机械工业出版社,2006.5

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 7-111-19025-4

I. 电... II. ①王...②王... III. ①电工技术—高等学校—教材②电子技术—高等学校—教材 IV. ①TM②TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第039161号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王保家 责任编辑:苏颖杰 版式设计:冉晓华

责任校对:李秋荣 封面设计:张静 责任印制:杨曦

北京机工印刷厂印刷

2006年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·23.5印张·580千字

定价:32.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68326294

编辑热线电话(010)88379711

封面无防伪标均为盗版

前 言

《电工电子技术》一书是吉林大学电工电子教学中心的老师们协同省内若干兄弟院校的同行，在近几年来进行的电工学课程的教学改革实践基础上，为推广高等院校中的精品课建设而编写的。

本书在满足教育部高等院校电工学课程指导组颁布的非电类“电工学”课程教学基本要求的基础上，采用了独具匠心的新颖写法，即从符合学生的认识规律出发以全新的组织结构把全书分为五篇（17章）：直流电路、交流电路、电机与控制、模拟电子电路、数字电子电路。同时在每篇结尾部分增加了综合训练，其内容包括：阶段小测验、趣味阅读、能力开发与创新三个栏目。小测验意在巩固学生的基本概念与基础知识，增加所学知识的内在联系，从而为后面的“能力开发与创新”打下一定的基础。趣味阅读意在教材具有崭新的视觉效果，增加趣味性和可读性，扩展学生的视野与思维，从而提高学习本门课程的兴趣与动力。能力开发与创新意在符合学生从感性到理性、再感性再理性的螺旋式上升的认知规律，从而引导培养学生的创新意识。因此本教材的使用若能与教学方法的改革，实验内容、手段的更新紧密结合起来，效果会更佳。

全书由王鼎、王桂琴担任主编，詹迪铤、吴丽波、葛玉明担任副主编，刘刚教授担任主审。王桂琴编写第一章、第二章、第三章、第四章（第九节除外）、第五章（第五节除外）、第十三章、第十四章、第十五章（第五、六节除外）；詹迪铤编写第十章、第十一章（第一、二节除外）、第十二章、第十五章第六节；葛玉明编写第六章、第七章（第六节除外），第八章（第六节除外）；吴丽波编写第九章；王鼎编写第十一章第二节；王汇平编写第十六章；常文秀编写第十七章；王芳荣编写第八章第六节；卜丽娜编写第七章第六节；张淑琴编写第五章第五节；郎淑芬编写第十一章第一节；雷治林编写第十五章第五节；尹程秋编写第四章第九节；第一、二、三、五篇综合训练由王丹编写；第四篇综合训练由许建平编写；附录一、附录二由王幼林编写；附录三由梁亮编写。全体编者参加了本书的构思审定及其他繁琐的事务工作。

本书在编写过程中得到了机械工业出版社、吉林省教育厅及吉林大学相关部门领导与同志的关心和帮助，在此向他们表示感谢。

本书配有电子教案，欢迎选用本书作教材的老师索取，索取邮箱：wbj@mail.machineinfo.gov.cn

由于编者的学识和水平有限，书中难免有不妥和疏漏之处，敬请使用本书的教师、学生和其他读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第一篇 直流电路

第一章 电路的基本概念和基本定律	1	第四节 戴维宁定理	19
第一节 电路和电路模型	1	习题	21
第二节 电路的基本物理量及其参考方向	2	第三章 电路的暂态分析	25
第三节 理想电路元件	4	第一节 暂态分析的基本概念与换路定律	25
第四节 基尔霍夫定律	9	第二节 RC 电路的暂态过程	27
第五节 电路中的电位及其计算	11	第三节 一阶电路暂态分析的三要素法	32
习题	12	第四节 RL 电路的暂态过程	33
第二章 电路的分析方法	15	习题	37
第一节 支路电流法	15	第一篇综合训练	40
第二节 叠加原理	16		
第三节 电压源与电流源的等效变换	17		

第二篇 交流电路

第四章 单相正弦交流电路	47	习题	75
第一节 正弦交流电的基本概念	47	第五章 三相交流电路	79
第二节 正弦交流电的相量表示法	50	第一节 三相交流电源	79
第三节 单一理想元件的交流电路	52	第二节 负载星形联结的三相电路	81
第四节 RLC 串联的交流电路	57	第三节 负载三角形联结的三相电路	83
第五节 阻抗的串联与并联	60	第四节 三相电路的功率	85
第六节 正弦交流电路的分析方法	61	第五节 安全用电	86
第七节 功率因数的提高	65	习题	89
第八节 正弦交流电路中的谐振	67	第二篇综合训练	92
第九节 非正弦交流电路	71		

第三篇 电机与控制

第六章 铁心线圈与变压器	97	第六节 单相异步电动机	126
第一节 磁路	97	第七节 控制电机	128
第二节 铁心线圈电路	100	习题	131
第三节 变压器	102	第八章 电动机的控制	133
习题	110	第一节 常用低压控制电器	133
第七章 电动机	111	第二节 电动机的基本控制电路和保护环 节	137
第一节 三相异步电动机的基本结构	111	第三节 顺序控制	140
第二节 三相异步电动机的工作原理	112	第四节 行程控制	141
第三节 三相异步电动机的电磁转矩与机 械特性	115	第五节 时间控制	142
第四节 三相异步电动机的使用	118	第六节 PLC 的控制	144
第五节 三相异步电动机的铭牌和技术数 据	122	习题	154
		第三篇综合训练	157

第四篇 模拟电子电路

第九章 常用半导体器件	162	第十一章 集成运算放大器及其应用 ...	212
第一节 PN 结及其单向导电性	162	第一节 直接耦合放大电路	212
第二节 半导体二极管	165	第二节 差动放大电路	213
第三节 特殊二极管	168	第三节 集成运算放大器简介	216
第四节 晶体管(双极型三极管)	170	第四节 集成运放在信号运算电路中 的应用	219
第五节 场效应晶体管(单极型三极 管)	178	第五节 放大电路中的负反馈	225
第六节 晶闸管	182	第六节 集成运放在信号处理方面的应用 ...	231
习题	185	第七节 集成运放在信号产生方面的应用 ...	237
第十章 基本放大电路	189	习题	242
第一节 基本交流放大电路的组成	189	第十二章 直流稳压电源	248
第二节 放大电路的图解法	190	第一节 直流稳压电路的概述	248
第三节 静态工作点的稳定	195	第二节 整流电路	248
第四节 微变等效电路法	197	第三节 电容滤波电路	251
第五节 共集电极放大电路(射极输出 器)	202	第四节 串联型晶体管稳压电路	254
第六节 阻容耦合多级放大电路与功率放 大电路	206	第五节 集成稳压电路	255
习题	208	习题	258
		第四篇综合训练	261

第五篇 数字电子电路

第十三章 数字电路基础	268	第六节 存储器与可编程逻辑器件	326
第一节 数字电路概述	268	习题	333
第二节 基本逻辑关系及其门电路	271	第十六章 脉冲信号的产生和整形	338
第三节 TTL集成门电路	275	第一节 555 定时器的基本结构及工作	
第四节 MOS 门电路	280	原理	338
第五节 电平转换及接口电路	284	第二节 单稳态触发器	339
第六节 逻辑代数的基本公式和定律	287	第三节 多谐振荡器	341
习题	289	第四节 施密特触发器	343
第十四章 组合逻辑电路	291	习题	345
第一节 组合逻辑电路的分析	291	第十七章 模拟量和数字量的转换	347
第二节 组合逻辑电路的设计	293	第一节 数字-模拟转换器 (DAC)	347
第三节 编码器和译码器	296	第二节 模拟-数字转换器 (ADC)	350
第四节 数据分配器和选择器	302	习题	352
第五节 运算器	304	第五篇综合训练	355
习题	307	附录	361
第十五章 双稳态触发器和时序逻辑		附录一 电阻器和电容器标称值的识别	361
电路	309	附录二 目前市场常用的部分电子器件型	
第一节 基本双稳态触发器	309	号及参数	362
第二节 钟控双稳态触发器	310	附录三 部分中英文名词对照	364
第三节 寄存器	317	参考文献	368
第四节 计数器	319		
第五节 集成计数器	323		

第一篇 直流电路

第一章 电路的基本概念和基本定律

第一节 电路和电路模型

一、电路

电路是为能够实现某种需要、由若干电工元器件按一定方式相互连接起来的组合。电气工程中会遇到各种各样的电路，有些比较简单，有些很复杂，通常把比较复杂的电路称为网络，电路与网络没有本质上的差异。

电路一般由电源（信号源）、负载和中间环节三部分组成，其中：

电源（信号源）是将其他形式的能量或信号转换为电能或电信号的装置，例如发电机将机械能转换为电能，传感器将非电量信息转换为电信号等。

负载是取用电能，将电能转换为其他形式能量的装置，例如电动机将电能转换为机械能，扬声器将音频信号转换为声音等。

连接电源与负载之间的中间环节是传送、控制电能或电信号的部分，它包括连接导线、控制电器和保护元件（开关、熔断器）等。

例如，图 1-1-1a 所示就是一个最简单的手电筒电路，电池将化学能转换为电能，是电源；灯泡将电能转换为光能，是负载；开关和导线是连接电池与灯泡的中间环节。

电路的作用是：完成供电、通信、计算、测量和控制等方面的工作。就电路的功能而言，可以分为两类：一类是实现能量的传输、分配和转换，例如供电电路就是将电能转换为光能、热能、机械能等；另一类是实现信号的传递与处理，例如计算机将输入的数字信号加以运算、判断、处理，然后将新的数据输出显示。

二、电路模型

由于组成电路的电气设备和器件种类繁多，即使是很简单的电气设备或器件，在工作时所发生的物理现象也是很复杂的，这给电路分析带来了很大困难。但是，这些复杂的物理现象都是由一些基本的物理现象综合而成的，因此我们可以将电气设备或器件中的每一种基本物理性质用一个对应的理想元件来表示。

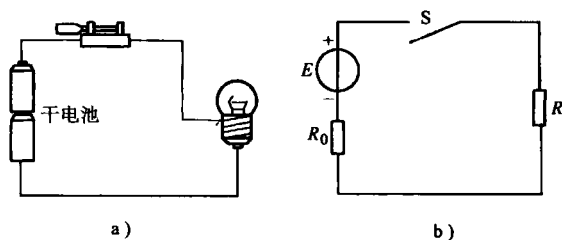


图 1-1-1 手电筒电路及其电路模型

a) 手电筒电路 b) 电路模型

电路分析的直接对象并不是那些由实际的电工器件构成的电路，而是分析从实际电路抽象出来的电路模型。这些电路模型是由表示实际器件的基本物理性质的理想元件组成的。

基本的理想元件有：电阻、电容、电感、电压源和电流源等，如图 1-1-2 所示。

图 1-1-1b 所示的电路即为图 1-1-1a 所示实际电路的电路模型，其中干电池用电压源 E 和内电阻 R_0 这两个理想元件的串联组合表示；消耗电能的灯泡用理想元件电阻 R 表示；连接电池与灯泡的开关 S 和金属导线的电阻都小，可忽略不计，故作为没有电阻的理想开关和导体处理。

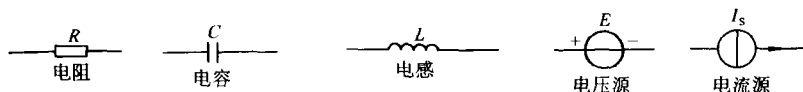


图 1-1-2 理想元件的电路模型

第二节 电路的基本物理量及其参考方向

一、电流及其参考方向

电荷在电场力作用下，做有规则的定向运动就是电流。我们把单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流强度，用以衡量电流的大小。电流强度简称为电流，即

$$i = \frac{dq}{dt}$$

大小和方向随时间变化的电流称为交变电流，用小写字母 i 表示。有的电流其大小和方向不随时间变化，即 $\frac{dq}{dt} = \text{常数}$ ，这种电流称为恒定电流，简称直流，用大写字母 I 表示。

分析电路时，除了要计算电流的大小外，同时还要确定它的方向，习惯上把正电荷运动的方向（或负电荷运动的相反方向）作为电流的方向，这种方向称为电流的实际方向，简称电流的方向。

电流的实际方向，在简单情况下是可以直接确定的。如在图 1-2-1 所示的直流电路中，我们可以从电源给定的正负极性判断出电流的方向。但在实际问题中，往往难以凭直观判断电流的实际方向。如在交流电路中，电流的方向随时间交变，根本无法用一固定的箭头标出它的实际方向。另外，即使在直流电路中，当求解复杂电路时，也难以事先判断出电流的实际方向。因此，为了解决这一困难，我们引用参考方向这个概念。

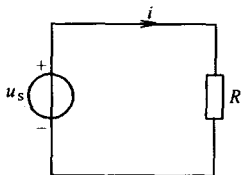


图 1-2-1 电流
的实际方向

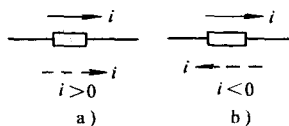


图 1-2-2 参考方向
与实际方向

什么是电流的参考方向呢？我们知道，任何一段电路中的电流只有两种可能的流向，若任意选某一方向作为电流的方向，在电路图中用箭头表示，并以这个方向列电路方程，分析

计算,那么这种人为规定的电流方向就称为电流的参考方向。

在规定参考方向后,电流可以用一个代数量表示,即它不仅数值,而且包含了正、负号。按参考方向分析电路得出的电流为正值 ($i > 0$),表明电流的参考方向与实际方向相同;反之,若得出的电流为负值 ($i < 0$),则表明电流的参考方向与实际方向相反。因此,只有参考方向选定之后,电流之值才有正负之分。如图 1-2-2 所示,实线箭头代表参考方向,虚线箭头代表实际方向。

电流的参考方向标注方法有两种,一是在电路中,画一个实线箭头,并标出电流名称;二是用双下标表示,如 I_{ab} 表示从 a 流向 b 的电流。

二、电压及其参考方向

电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功,定义为 a、b 两点间的电压 u_{ab} 。

$$u_{ab} = \frac{dw}{dq}$$

电路中任意两点间的电压就是这两点间的电位差,即

$$u_{ab} = V_a - V_b$$

若 a 点为高电位, b 点为低电位,则 u_{ab} 为正值。电压的方向规定为由高电位指向低电位,即电位降低的方向。电压的单位是伏特 (V)。

在分析与计算电路时,同电流一样,电压也要任意选定其参考方向。按照所选定的参考方向分析电路,得出的电压为正值 ($u > 0$),表明电压的实际方向与参考方向一致;反之,若得出的电压为负值 ($u < 0$),则表明电压的实际方向与参考方向相反。

电路中表示电压的参考方向有三种, a、b 两点间电压的参考方向一是用箭头表示;二是用“+”、“-”符号表示;三是书写时用双下标的 u_{ab} 表示,如图 1-2-3 所示。对一个元件或一段电路上的电压参考方向和电流参考方向可以独立地任意选定。若电压和电流的参考方向相同,则把电压和电流的这种参考方向称为关联参考方向,如图 1-2-4 所示。

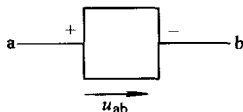


图 1-2-3

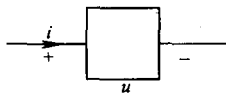


图 1-2-4

三、电动势及其参考方向

电动势在数值上等于非电场力把单位正电荷由负极经电源内部移到正极所做的功。显然,电动势的单位也是伏特 (V)。

通常规定电动势的实际方向是由电源的负极指向电源的正极。同电流和电压一样,在电路中所标出的电动势的方向也是它的参考方向。

注意,电源的端电压与电动势之间的关系如图 1-2-5 所示。

四、电能和电功率

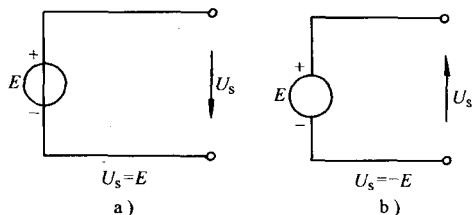


图 1-2-5

当一个电路元件两端加上电压 $u(t)$ ，流过电流 $i(t)$ 时，就会产生能量转换。从 t_0 到 t_1 的时间内，元件的电功可根据电压的定义求得

$$w = \int u dq$$

在电压和电流的关联参考方向下，由于 $i = dq/dt$ ，所以

$$w = \int_{t_0}^{t_1} u(t)i(t)dt$$

电能对时间的变化率就是电功率，简称功率，即

$$p = \frac{dw}{dt} = u(t)i(t)$$

式中， u 和 i 都是时间的函数，是代数量，因此电能 w 和功率 p 也是时间的函数，也是代数量。

在国际单位制 (SI) 中，电压的单位是伏特 (V)，电流的单位是安培 (A)，电荷的单位是库仑 (C)，时间的单位是秒 (s)，电能的单位是焦耳 (J)，功率的单位是瓦特 (W)。

元件上的电能与电功率有发出和吸收两种可能。进行电路分析时，电压和电流采用的是参考方向，两者之间可能是关联参考方向，也可能是非关联参考方向。这种情况下，怎样确定元件是发出功率还是吸收功率，可作如下规定：

- 1) 在电压和电流关联参考方向下 $p = u(t)i(t)$ 。
- 2) 在电压和电流非关联参考方向下 $p = -u(t)i(t)$ 。

在此规定下，将按参考方向计算出来的电压、电流代入到计算功率的公式中，如果计算结果 $p > 0$ ，表示电压与电流的实际方向相同，元件吸收功率，是负载；反之，若计算结果为 $p < 0$ ，表示电压与电流实际方向相反，元件发出功率，是电源。

【例 1-2-1】 图 1-2-6 是一个含有电压源和负载的闭合电路。电压源电压 $U_s = 24V$ ，内阻 $R_s = 0.5\Omega$ ，负载电阻 $R = 7.5\Omega$ 。求：

- (1) 电路中的电流。
- (2) 负载端电压。
- (3) 各元件的功率。

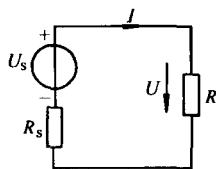


图 1-2-6

解：(1) 电路中的电流 $I = \frac{U_s}{R_s + R} = \frac{24}{0.5 + 7.5} A = 3A$

(2) 负载端电压 $U = IR = 3A \times 7.5\Omega = 22.5V$

(3) 各元件的功率为

$$P_s = -U_s I = -24V \times 3A = -72W \quad (\text{电源产生的功率})$$

$$P = UI = 22.5V \times 3A = 67.5W \quad (\text{负载消耗的功率})$$

$$\Delta P = I^2 R_s = 3^2 \times 0.5W = 4.5W \quad (\text{电源内阻消耗的功率})$$

第三节 理想电路元件

一、理想无源元件

(一) 电阻元件

线性电阻元件在电路中的图形符号如图 1-3-1 所示。

在电压和电流关联参考方向下，按欧姆定律线性电阻元件的电压、电流关系为

$$i = \frac{u}{R}$$

上式中的 R 称为元件的电阻，是一正常数，当电压用伏特 (V)，电流用安培 (A) 表示时，电阻的单位为欧姆 (Ω)。

若电阻元件的电压和电流是非关联参考方向 (见图 1-3-2)，则欧姆定律应写为

$$i = -\frac{u}{R}$$

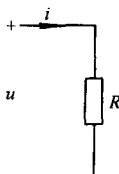


图 1-3-1 电阻电路

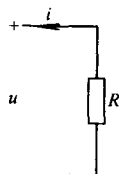


图 1-3-2 u 与 i 参考方向相反

电阻元件的特性常用元件两端的电压与通过它的电流之间的关系曲线 $u = f(i)$ 或 $i = f(u)$ 表示，这种曲线称为伏安特性，它可以通过实验作出。

若电阻值不随电压、电流变化而变化，则称此电阻为线性电阻。常用的电阻器可视为线性电阻元件。线性电阻的伏安特性是通过坐标原点的一条直线，如图 1-3-3a 所示。

若电阻值随电压、电流变化而变化的电阻则称为非线性电阻，例如常用的晶体二极管、晶体三极管就是非线性电阻元件。非线性电阻的伏安特性是一条曲线，如图 1-3-3b 所示。

线性电阻中通过的电流与两端电压成正比。

在电压和电流的关联参考方向下，任何时刻电阻元件吸收的功率

$$p = ui = Ri^2$$

电阻 R 是正实数，电阻元件吸收的功率总是大于零，其吸收的能量常以热的形式消耗掉，所以线性电阻元件不仅是无源元件，还是耗能元件。

从初始时刻 t_0 到任意时刻 t 期间，电阻元件消耗的电能为

$$W_R = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi$$

(二) 电感元件

1. 电感

在电工技术中，由导线绕制而成的线圈能够产生比较集中的磁场，如图 1-3-4a 所示。在忽略很小的导线电阻条件下，可以认为线圈只有电感参数，是一个理想电感元件。

当线圈两端加上电压 u ，便有电流 i 通过，线圈即产生磁场，若穿过一匝线圈的磁通为

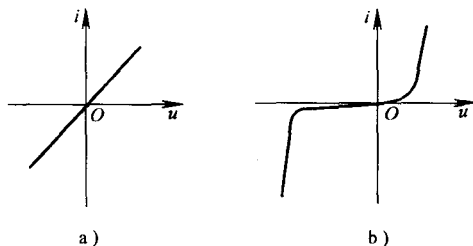


图 1-3-3 电阻元件的伏安特性

a) 线性电阻的伏安特性 b) 晶体二极管的伏安特性

Φ , 则与 N 匝线圈交链的总磁通为 $N\Phi$ 。总磁通 $N\Phi$ 通常称为磁链 Ψ , 即 $\Psi = N\Phi$ 。当电流增大时, Ψ 亦增大; 电流减少, Ψ 亦减小。因此磁链是电流的函数。为了衡量线圈产生磁场的能力, 取线圈的磁链与电流的比值, 即

$$L = \frac{\Psi}{i}$$

式中, L 称为自感系数, 简称电感。当磁链的单位是韦伯 (Wb), 电流的单位是安培 (A) 时, 电感的单位是亨 (H)。电感在电路中的符号如图 1-3-4b 所示。

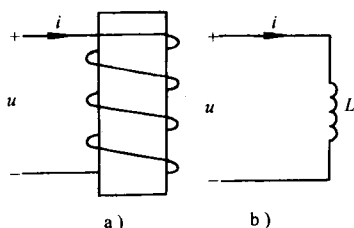


图 1-3-4 电感电路

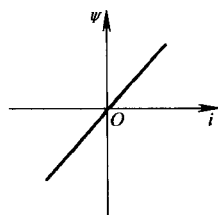


图 1-3-5 线性电感元件的韦安特性

电感的大小与线圈的尺寸、匝数以及周围介质的导磁性能有关。若电感线圈周围介质为非铁磁物质 (如空心线圈), 磁链 Ψ 与电流 i 成正比, L 为常数, 则电感元件称为线性电感元件, 其韦安特性如图 1-3-5 所示。带有铁心的线圈, L 不是常数, 则属于非线性电感元件。

2. 电压电流关系

当线性电感元件中的电流发生变化时, 穿过线圈的磁通也相应地发生变化, 根据电磁感应定律, 则在线圈两端产生自感电动势 e_L 。在图 1-3-4 所示电路中, 若电流 i 与电压 u 的参考方向相同, 则自感电动势为

$$e_L = - \frac{d\Psi}{dt} = - L \frac{di}{dt}$$

考虑到电压的参考方向规定为由高电位指向低电位, 而电动势参考方向的规定与之相反, 因此有

$$u = - e_L = L \frac{di}{dt}$$

这就是电感元件的特性方程, 它说明:

电感元件两端电压与电流的变化率成正比。电流变化快, 感应电压高, 电流变化慢, 感应电压低。若电感元件中通过的电流是不随时间变化的直流时, $i = I$, $\frac{di}{dt} = 0$, 所以电感元件对直流相当于短路。

3. 能量关系

如果在 t_0 时刻电感的初始电流 $i(t_0) = 0$, 这时电感元件没有磁通, 其磁场能量为零。则电感元件在任意时刻 t 所储存的磁场能量 $W_L(t)$ 将等于它所吸收的电能, 为

$$W_L(t) = \int_0^t u i dt = \frac{1}{2} L i^2(t)$$

(三) 电容元件

1. 电容

任何两块金属导体在中间隔以绝缘介质，就构成一个电容器。忽略很小的漏电损失，可以认为电容器只具有电容参数，是理想电容元件。当电容器两端加上电压后，它的两块金属板上就会聚集起等量而异号的电荷，如图 1-3-6a 所示。电压愈高，聚集的电荷愈多，产生的电场愈强，储存的电场能量愈多。为了衡量电容器储存电荷的能力，取电容器储存的电荷量与电压的比值，即

$$C = \frac{q}{u}$$

式中， C 为电容器的电容量，简称电容。当电荷的单位是库仑 (C)，电压的单位是伏特 (V) 时，电容的单位是法拉 (F)。电容在电路中的符号如图 1-3-6b 所示。

电容的大小与电容器本身的几何尺寸及其极板间的绝缘介质的性能有关。若电容器储存的电荷与所加电压成正比， C 为常数，这样的电容元件称为线性电容元件，如图 1-3-6c 所示；否则就是非线性电容元件。

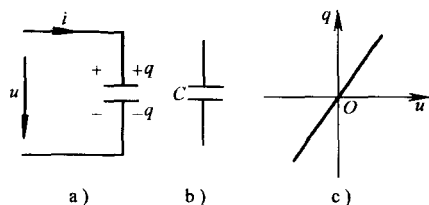


图 1-3-6 线性电容元件

2. 电压与电流的关系

当加在电容两端的电压发生变化时，极板上的电荷量 $q = Cu$ 也相应地发生变化，根据电流的定义，电路中就会产生电流，在电压 u 和电流 i 参考方向相同的情况下，即有

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt}$$

这就是电容元件的特性方程，它说明：

电容中的电流 i 与两端电压 u 的变化率成正比，电压变化快，电容电流大；电压变化慢，电容电流小。若电容两端电压是不随时间变化的直流电压时， $u = U$ ， $\frac{du}{dt} = 0$ ，则 $i = C \frac{du}{dt} = 0$ ，即电容元件对直流相当于开路。

3. 能量关系

如果在 t_0 时刻电容的初始电压 $u(t_0) = 0$ ，这时电容元件处于未充电状态，其电场能量为零，则电容元件在任意时刻 t 所储存的电场能量 $W_c(t)$ 将等于它所吸收的电能，即

$$W_c(t) = \int_0^t u i dt = \frac{1}{2} C u^2(t)$$

二、理想电源元件

(一) 电压源

电压源有理想电压源和实际电压源之分。理想电压源又称为恒压源，它是从实际电压源抽象出来的一种理想元件。

1. 理想电压源 (恒压源)

理想电压源的电路模型如图 1-3-7a 所示。

它具有以下两个性质：

1) 电源的端电压 U 恒等于电源的电动势 E ，与流过它的电流无关。

2) 流过恒压源电流是任意的, 由负载电阻和电动势 E 确定。

理想电压源的上述性质可以用图 1-3-7b 所示的伏安特性曲线来表征。

2. 实际电压源

事实上, 理想电压源是不存在的, 因为任何实际电压源都有内阻, 所以当有输出电流时, 内阻上就会产生压降, 并且消耗一定的能量。

实际电压源电路模型是用恒压源与内阻的串联表示, 如图 1-3-8a 所示。

实际电压源的端电压与电流的关系可表示为

$$U = E - IR_0$$

其伏安关系如图 1-3-8b 所示。由此可知, 当输出电流增加时, 输出电压下降, 并且内阻越大, 输出电压的变化也越大。

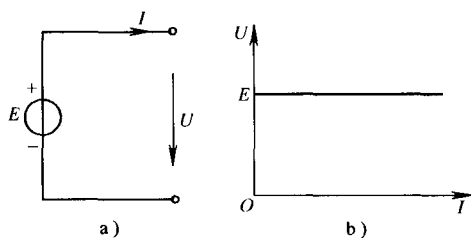


图 1-3-7 理想电压源
a) 电路模型 b) 伏安特性

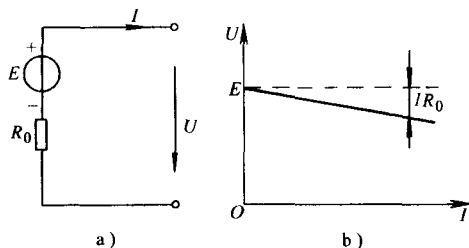


图 1-3-8 实际电压源
a) 电路模型 b) 伏安特性

(二) 电流源

电流源也有理想电流源和实际电流源之分, 理想电流源又称恒流源。

1. 理想电流源 (恒流源)

理想电流源的电路模型如图 1-3-9a 所示。

它具有以下两个性质:

- 1) 输出电流恒等于 I_s , 与其端电压无关。
- 2) 恒流源两端的电压是任意的, 由负载电阻和电流 I_s 确定。

理想电流源的上述性质可用图 1-3-9b 所示的伏安特性曲线来表征。

2. 实际电流源

实际电流源的电路模型是用理想电流源和一个内阻 R_0 并联的组合表示, 如图 1-3-10a 所示。

实际电流源的伏安关系表示为

$$I = I_s - \frac{U}{R_0}$$

其伏安关系如图 1-3-10b 所示。可见, 实际电流源输出的电流是随着输出电压的增加而减小的。

(三) 受控源

在电路分析中, 我们还常常遇到另外一种类型的元件——受控源。受控电压源的电压和受控电流源的电流都不是给定的时间函数, 而是受某一支路电流或电压控制的, 因此受控源为非独立电源。

为了和独立电源区别, 我们把受控源的电路符号用菱形来表示。

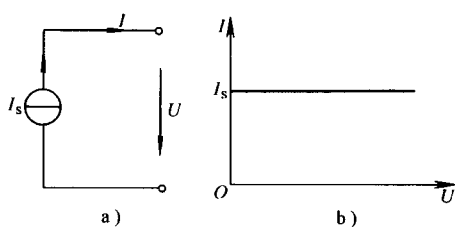


图 1-3-9 理想电流源
a) 电路模型 b) 伏安特性

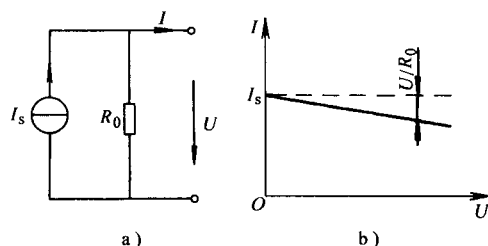


图 1-3-10 实际电流源
a) 电路模型 b) 伏安特性

根据控制量是电压还是电流，受控的是电压源还是电流源，受控源共有四种：电压控制电压源（VCVS）、电压控制电流源（VCCS）、电流控制电压源（CCVS）、电流控制电流源（CCCS），它们在电路中的图形符号如图 1-3-11 所示，图中控制量 u_1 为电路中某两点的电压， i_1 为电路中某支路的电流。

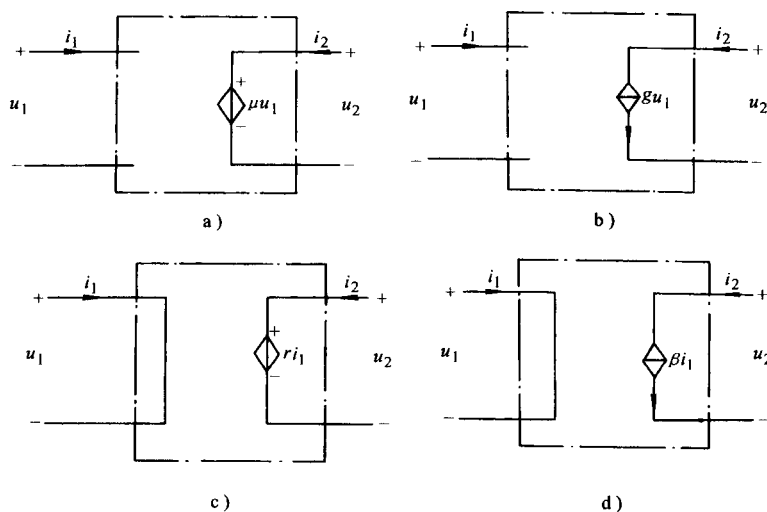


图 1-3-11 受控源
a) VCVS b) VCCS c) CCVS d) CCCS

四种受控源的伏安关系为

$$\text{VCVS: } u_2 = \mu u_1$$

$$\text{CCVS: } u_2 = r i_1$$

$$\text{VCCS: } i_2 = g u_1$$

$$\text{CCCS: } i_2 = \beta i_1$$

式中， μ 、 g 、 r 和 β 统称为控制系数。其中 μ 和 β 无量纲， μ 称为转移电压比，或称电压放大系数； β 称为转移电流比，或称电流放大系数； g 具有电导的量纲，称为转移电导； r 具有电阻的量纲，称为转移电阻。当这些控制系数为常数时，被控制量与控制量成正比，这种受控源是线性受控源。

第四节 基尔霍夫定律

电路的基本定律除了欧姆定律外，还有基尔霍夫定律。该定律描述了电路中各部分电流

之间和电压之间的关系，它是分析与计算电路的理论基础。

在介绍基尔霍夫定律之前，先以图 1-4-1 所示电路为例，说明几个名词。

支路：电路中的每个分支称为支路，一条支路流过同一个电流。在图 1-4-1 所示电路中一共有三条支路。

节点：电路中三条或三条以上支路连接的点称为节点，在图 1-4-1 所示电路中一共有两个节点，节点 a 和 b。

回路：电路中任意一个闭合路径叫回路，图 1-4-1 所示电路中 acba、abda 和 acbda 都是回路。

网孔：在电路中，电路内部不含有支路的回路叫网孔。图 1-4-1 所示电路中 acba 和 abda 是网孔。

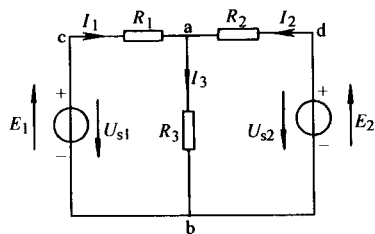


图 1-4-1 电路举例

一、基尔霍夫第一定律 (KCL)

基尔霍夫第一定律也称为基尔霍夫电流定律，内容是：任一瞬时，对电路中的任一节点，流入节点的电流之和等于流出该节点的电流之和。其数学表达式为

$$\sum I_i = \sum I_o$$

将上式的右边移至左边可写成

$$\sum I = 0$$

这就是说，如果规定流入节点的电流为正，流出节点的电流为负，那么，在任一瞬时，任一节点上电流的代数和恒为零。

对于图 1-4-1 所示电路，对节点 a 写出的节点电流方程为

$$I_1 + I_2 = I_3$$

或

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

基尔霍夫电流定律不仅适用于节点，而且还适用于广义节点（任意假定的封闭面）。例如在图 1-4-2a 和 1-4-2b 所示的电路中，基尔霍夫电流定律的表达式为

$$I_A + I_B + I_C = 0$$

$$I_B + I_C = I_E$$

基尔霍夫电流定律体现的是电流的连续性，即在电路中的任何一点包括节点，电荷既不能堆积，也不能消失。

二、基尔霍夫第二定律 (KVL)

基尔霍夫第二定律也称为基尔霍夫电压定律，内容是：在任一瞬时，对电路中的任一回路，沿任一绕行方向绕行一周，回路中各段电压的代数和恒等于零。数学表达式为

$$\sum U = 0$$

上式中凡是与绕行方向一致的电压取正，反之取负。

例如，对于图 1-4-3 所示电路，基尔霍夫第二定律的回路电压方程为

$$U_1 - U_2 + U_{s2} - U_{s1} = 0$$

或写成

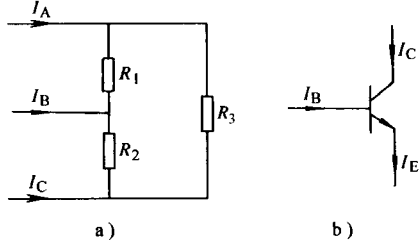


图 1-4-2 基尔霍夫电流定律推广

a) 三角形电路 b) 晶体管